

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Měření charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati, regulace průtoku
frekvenčním měničem**

**Measurement characteristic of the Fan on the air line ,Flow control by
frequency converter**

Student

Lukáš Krabica

Vedoucí Bakalářské práce

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Krabica**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Měření charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati, regulace průtoku frekvenčním měničem**
Measurement Characteristics of the Fan on the Air Line, Flow Control by Frequency Converter

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování literární rešerše k ventilátorům (typy, konstrukce, charakteristiky, měření charakteristiky).
2. Měření tlaku a průtoku při proudění vzduchu. Metody měření. Charakteristika měřicích zařízení k měření tlaku a průtoku vzduchu.
3. Návrh experimentální měřicí tratě k měření charakteristiky ventilátoru při proudění vzduchu (umístění měřidel a vyhodnocení měřených veličin).
4. Provedení měření charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati.
5. Vyhodnocení výsledků měření (grafy, tabulky).

Seznam doporučené odborné literatury:

DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin - učební text*. VŠB-TU Ostrava, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1508-4.
MIKAN, J. *Měření plynů*. Říčany u Prahy, 2003. 386 s. ISBN 80-7328-053-1.
JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995. 155 s.
JENČÍK, J.; KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. Praha: SNTL Praha, 1982. 580 s.
NOSKIEVIČ, J.; JANALÍK, J.; RÝC, Z.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin příručka pro laboratorní cvičení*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1987. 152 s. ISBN-80-03-00308-3.
VINOPAL, S.; KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. Praha: SNTL Praha, 1963. 650 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

„Prohlašuji že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace ze kterých jsem čerpal,,

V Ostravě 18.5 2015

Kubra

Podpis

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ сже́днано, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18.5 2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Krabica

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Rolnická 1787

Uherský Brod, 68801

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D. za velmi ochotnou pomoc a cenné rady při měření a psaní mé bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KRABICA, L. Měření charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati, regulace průtoku frekvenčním měničem: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2015.

Vedoucí práce: Bojko, M.

Bakalářská práce se zabývá měřením charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati, řízené pomocí frekvenčního měniče. V úvodu je definována problematika a způsoby měření tlaků, průtoku vzdušiny a kapalin. Následně na základě rozboru měření byla navržena experimentální měřicí trať, na které probíhalo praktické měření a následně vyhodnocení získaných dat. Měření průtoku bylo prováděno na trati pomocí digitálního průtokoměru a měření tlaku pomocí digitálního snímače tlaku pro vzdušiny. Výsledky měření jsou vyhodnocené pomocí tabulek a grafických závislostí.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Průtok, tlak, měření průtoku vzduchu digitálním průtokoměrem, digitální převodník tlaku, experimentální vzduchová trať,

ANNOTATION OF BACHELORS THESIS

KRABICA, P. Measurement Characteristic of the Fan on the Air Line, Flow Control by Frequency Converter : Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2014, p. Thesis head: Bojko, M.

This bachelors thesis deals with Measurement Characteristic of the Fan on the Air Line, Flow Control by Frequency Converter. In the introduction is defined issue and ways to measure pressure of an air flow and liquids. Subsequently, based on analysis of the experimental measurements, experimental air flow line were designed on which subsequently take place the practice measurement and data evaluation. Flow measurements on the air line were done by digital flow meter and the pressure measurements using a digital pressure sensor for air pressure. Outcomes of measurement are evaluated by tables and graphs

KEY WORD: Flow, pressure, Measurement of air flow by digital flow meter, digital pressure sensor, experimental air flow line,

Obsah

strana

Seznam použitých označení.....	9
Úvod	11
1 Proudění skutečných tekutin.....	12
2 Charakteristika a rozdělení ventilátoru.....	13
2.1 Základní rozdělení ventilátorů dle různých kritérií.....	14
2.2 Hlavní parametry ventilátorů.....	16
2.3 Charakteristika měřeného ventilátoru HRD FU/FUK.....	20
3 Teorie měření průtoku plynu.....	20
3.1 Rychlostní průtokoměry.....	21
3.2 Objemové průtokoměry.....	23
3.3 Průtokoměry s měřením rozdílu tlaků.....	25
3.4 Objemové průtokoměry.....	27
3.5 Rychlostní sondy k měření rychlosti.....	29
4 Měření tlaku.....	31
4.1 Kapalinové tlakoměry.....	31
4.2 Další druhy tlakoměrů.....	33
5 Návrh eperimentálního měření.....	34
6 Specifikace prvků a měřidel.....	36
7 Postup měření.....	39
8 Vyhodnocení praktického měření.....	41

9 Závěr.....	44
10 Seznam použité literatury.....	45

Seznam použitých označení

Značení	Význam	Jednotka
Q_m	Hmotnostní průtok	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_v	Objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
S	Plocha	$[\text{m}^2]$
V	Objem	$[\text{m}^3]$
D	Průměr potrubí	$[\text{m}]$
g	Tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
h	Výška	$[\text{m}]$
l	Délka	$[\text{m}]$
m	Hmotnost	$[\text{kg}]$
p	Tlak	$[\text{Pa}]$
Δp	Tlaková difference	$[\text{Pa}]$
p_1	Absolutní tlak	$[\text{Pa}]$
v	Rychlost proudění	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_s	Střední rychlost proudění	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
η	Dynamická viskozita	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
λ	Součinitel tření	$[-]$
ν	Kinematická viskozita	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$

ρ	Hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ξ	Součinitel místních ztrát	$[-]$
v_s	Střední rychlost proudění	$[\text{m/s}]$
n	Počet otáček	$[\text{min}^{-1}]$
T_N	Normalní teplota	$[^{\circ}\text{K}]$

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá měřením charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati řízeného pomocí frekvenčního měniče. Průtok byl měřen digitálním průtokoměrem, který pracuje na principu žhavicího anemometru. K odčítání tlaku byl použit digitální převodník tlaku typu Almemo FD8612DPS, ze kterého byla odečítána hodnota tlaku na výstupu z ventilátoru.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. První část je teoretická a obsahuje teorii měření plynů. Je zde popsán základní princip měření, ale také jaké druhy proudění mohou nastat při proudění plynů v potrubí. Dále je rozepsáno rozdělení ventilátorů, rozdělení, dle maximálního tlaku, počtu stupňů a pohonu. Následně jsou uvedené charakteristiky a to tlaková, příkonová a výkonnostní. Na tuto kapitolu navazuje charakteristika měřeného ventilátoru od výrobce. V další kapitole je uvedeno základní rozdělení průtoků a metody k měření průtoků. Jsou zde popsány metody objemové a hmotnostní. Ke každé metodě jsou následně uvedeny základní typy měřidel průtoků. Další část se zabývá měřením tlaku. V této kapitole jsou popsány typy měřidel k měření tlaku a principy na kterých pracují.

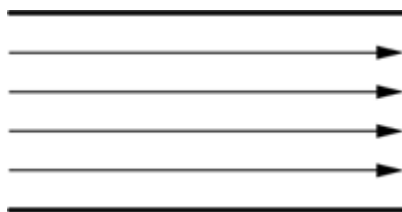
Další část práce je praktické měření a vyhodnocování naměřených dat. Měření probíhalo v místnosti E-306 katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení. K vyhodnocení naměřených dat byl použit software Microsoft office excel 2010. Pro měření charakteristiky ventilátoru byla navržena experimentální měřicí vzduchová trať. Navržená trať obsahovala prvky jako digitální převodník tlaku a digitální průtokoměr, který pracuje na principu žhavicího anemometru. Po sestavení měřicí trati probíhalo praktické měření při kterém, se pomocí frekvenčního měniče, měnila frekvence v rozsahu od (10 ÷ 100 Hz). Na konci měřicí trati byl plastový kulový ventil kterým se reguloval průtok. Při prvním měření byl nejdříve plně otevřen a poté přiškrcován a současně byla odečtena hodnota relativního tlaku p_1 za ventilátorem a průtoku Q_v v $[Nm^3/h]$. Digitální průtokoměr měřil průtok v normálních metrech krychlových. Následně byl měřený průtok přepočítán na pracovní podmínky při měření. Po zapsání dat do předem připravené tabulky byl ventil postupně přiškrcován až do polohy téměř uzavřeno. Současně byly odečteny hodnoty průtoků a tlaku z digitálního převodníku tlaku a digitálního průtokoměru, pro každou z 8 poloh kulového ventilu pro rozsah frekvence (10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 Hz).

1 Proudění skutečných tekutin

Proudění je pohyb tekutiny, při kterém se částice tekutiny pohybují svým neuspořádaným pohybem a zároveň se posouvají ve směru proudění. Vyskytují se dva druhy proudění laminární a turbulentní proudění.

Laminární proudění

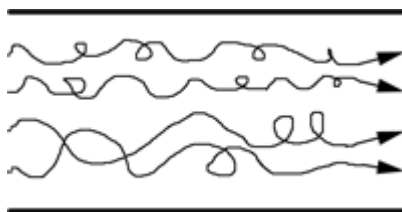
Při laminárním proudění (obr.1.1) se vrstvy proudící tekutiny mezi sebou nemíchají a převládají třecí síly. Částice tekutiny se pohybují po drahách které se navzájem neproplétají ani nijak nekřížují. Průřezová rychlost je rozložena parabolicky, což znamená že nejvyšší rychlost proudění je ve středu (v ose) daného potrubí a nejpomalejší v místě styku vrstev se stěnami potrubí, kde nejvíce převládají třecí účinky.[1]



Obrázek 1.1 Laminární proudění [2]

Turbulentní proudění

U turbulentního proudění (obr.1.2) se vrstvy mezi sebou navzájem míchají, proudnice se promíchávají a vytvářejí víry což nepříznivě ovlivňuje proudění dané tekutiny a snižuje tak i průtok. Při turbulentním proudění mají hlavní účinné síly setrvačné. Pro zlepšení průtoku při turbulentním proudění je třeba významně zvýšit tlak kapaliny.[1]



Obrázek 1.2 Turbulentní proudění [2]

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je bezrozměrné číslo charakterizující chování proudící kapaliny. Podle jeho hodnoty lze usuzovat, zda bude proudění laminární nebo turbulentní.

Vypočte se podle vztahu[11]:

$$\mathbf{Re} = \frac{v_s d}{\nu} \quad (1.1)$$

- kde
- d průměr potrubí [m]
 - v_s střední rychlost proudění [m/s]
 - ν kinematická viskozita tekutiny [Pa.s]

Pro různé typy potrubí a různé typy kapalin se stanovují experimentálně kritické hodnoty Reynoldsova čísla. Je-li hodnota Reynoldsova čísla nižší než kritická hodnota odpovídající danému uspořádání, je proudění laminární. Je-li hodnota Reynoldsova čísla vyšší, je proudění turbulentní.[11] V okolí kritické hodnoty která se pohybuje kolem $Re = 2320$, je přechodná oblast mezi zjevně laminárním a zjevně turbulentním prouděním.[10]

2 Charakteristika a rozdělení ventilátoru

Jedná se o rotační stroj s lopatkami osazenými na lopatkovém kole, který se ve většině případů používá pro dopravu vzdušín, plynů a spalín bez nároku na vysoký kompresní poměr. Ventilátory slouží k použití do tlaku maximálně 3,5 Mpa, pro větší tlaky se používají kompresory. Pro vznik a udržení proudu vzduchu stačí jen nízký tlakový rozdíl přibližně 0,01Mpa, tudíž se zvýšení teploty vzduchu stlačováním ve ventilátoru zanedbává. Dle směru proudění vzdušín se ventilátory rozdělují na axiální, radiální, diagonální, diametrální. Ve většině případů slouží ventilátory k výměně vzduchu v místnosti například , stolními ventilátory, nebo ventilátory obsaženými v klimatizačních jednotkách.

2.1 Základní rozdělení ventilátorů dle různých kritérií

V obrázku (2.1) je popsáno rozdělení ventilátorů dle 4 kritérií a to dle maximálního tlaku, počtu stupňů, pohonu a způsobu spojení ventilátoru.

Rozdělení Dle			
Maximálního tlaku	Nízkotlaké do 1 kPa	Středotlaké (1 -3,5) kPa	Vysokotlaké (3,5 a více) kPa
Počtu stupňů	Jednostupňové	Vícestupňové	
Pohonu	Elektromotorem	Pneumatický	Ruční
Způsobu Spojení	Napřímo	Přes spojku	S převodem

Obrázek 2.1 Tabulka rozdělení ventilátorů

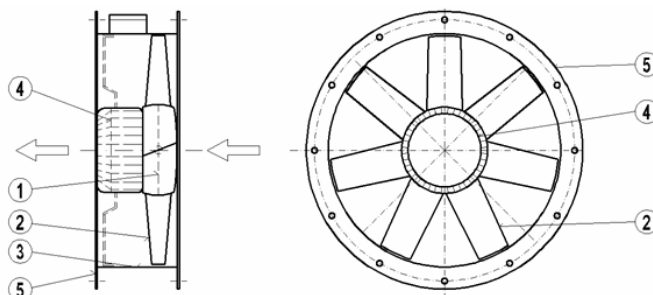
Základní typy a konstrukce ventilátorů

Ventilátory se konstrukčně rozdělují dle svého využití do mnoha skupin např. (ventilační jednotky, domácí ventilátory). Dle maximálního tlaku se dělí na nízkotlaké až vysokotlaké a dle výstupu vzdušiny z ventilátoru na axiální, radiální, diagonální a diametrální.

Axiální ventilátor

Základní schéma axiálního ventilátoru, je znázorněno na obrázku (2.2), skládá se z rotoru (1) s oběžnými lopatkami (2), pláště (3), elektromotoru (4), přírub (5). Axiální ventilátor lze použít v případě že je třeba dosáhnout vysokého průtoků vzdušiny, ovšem bez požadavku vysokého tlaku na dopravu vzdušiny. Vzdušiny se u axiálních ventilátorů pohybují v axiální směru tj. ve směru otáčení oběžného kola.

1. Rotor
2. Oběžná lopatka
3. Plášť ventilátoru
4. Elektromotor
5. Příruba



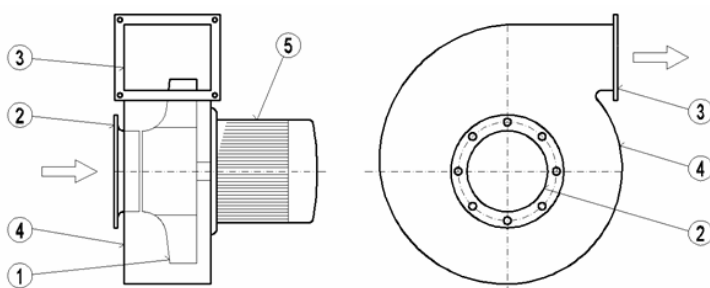
Obrázek 2.2 Konstrukce axiálního ventilátoru [3]

Radiální Ventilátor

Hlavními součástmi radiálního ventilátoru (obrázek 2.3) jsou oběžné kolo (1), sací hrdlo (2), výtlačné hrdlo (3), spirální skříň (4) a elektromotor (5). Oběžné kolo u radiálního ventilátoru je uloženo ve spirální skříni. Lopátkové kanály které jsou součástí oběžného kola uskutečňují nasátí vzdušiny v axiálním směru a výtlač ve směru který je kolmý na osu otáčení tj. radiální směr. Dle tvaru lopatek na oběžném kole lze radiální ventilátory rozdělit na: ventilátor s dopředu zahnutými lopatkami, ventilátor s dozadu zahnutými lopatkami a ventilátor s radiálně zakončenými lopatkami.

Konstrukce:

1. Oběžné kolo
2. Nasávací hrdlo
3. Výtlačné hrdlo
4. Spirální skříň
5. Elektromotor



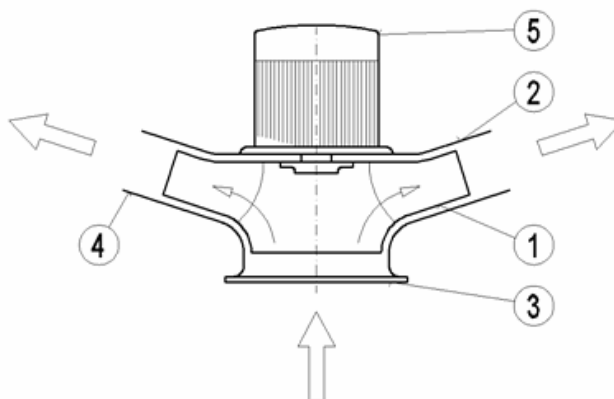
Obrázek 2.3 Konstrukce radiálního ventilátoru [3]

Diagonální ventilátor

Vzdušiny vstupují do ventilátoru v axiálním směru tj. ve směru otáčení oběžného kola ale vystupují z ventilátoru pod nižším úhlem než pravý úhel. Podobné systémy se užívají v automobilovém průmyslu. Schéma tohoto typu ventilátoru je znázorněno na obrázku (2.4), kde jsou vyznačeny hlavní součásti jako: oběžné kolo (1), skříň ventilátoru (2), sací hrdlo (3), výtlačné hrdlo (4) a elektromotor (5).

Konstrukce

1. Oběžné kolo
2. Skříň
3. Sací hrdlo
4. Výtlačné hrdlo
5. Elektromotor



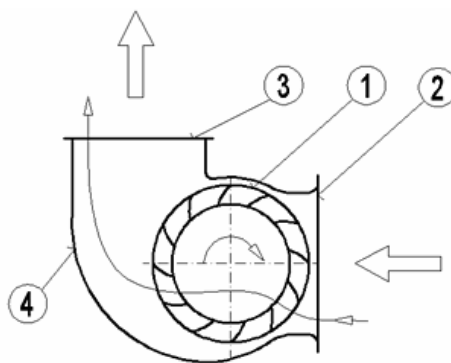
Obrázek 2.4 Konstrukce radiálního ventilátoru [3]

Diametrální Ventilátor

U diametrálního ventilátoru se vzdušiny nasávají přes sací hrdlo (2) na vnějším obvodu oběžného kola (1). Vzdušina pak dále prochází příčně oběžným kolem a vystupuje na vnějším obvodu. Poté vzdušina míří do výtlačného hrdla (3) viz obrázek (2.5). Oběžné kolo má dopředu zahnuté lopatky. Účinnost tohoto typu ventilátoru se pohybuje v rozmezí (45 – 55 %).

Konstrukce

1. Oběžné kol
2. Sací hrdlo
3. Výtlačné hrdlo
4. Skříň



Obrázek 2.5 Konstrukce Diametrálního ventilátoru [3]

2.2 Hlavní parametry ventilátoru

Ventilátory obecně jsou charakterizovány těmito hodnotami: rozměry, napětí (Střídavý proud / stejnosměrný proud), výkonem, průtokem vzduchu, celkovým dopravním tlakem, systémem uložení a hlučností.

a) Objemový průtok vzduchu Q_v

Průtokem vzduchu je myšlená hodnota množství vzdušiny, která je přesunuta rotační částí ventilátoru za určitou dobu. Množství vzduchu, které je schopen ventilátor dopravit, určuje objemový průtok vzduchu Q_v [m^3/s], který je udáván zpravidla pro hustotu vzduchu ($\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$). Pro různé druhy ventilátorů se objemový průtok vzduchu může pohybovat v širokém rozmezí hodnot od $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$ až po cca. $300 \text{ m}^3/\text{s}$. [3]

b) Celkový dopravní tlakový spád Δp

Ventilátor musí zajistit průtok vzduchu sítí, což je vlastnost určená celkovým dopravním tlakem ventilátoru Δp [Pa]. Pro překonání tlakové ztráty potrubního systému a vřazených elementů (odporů) slouží statická složka tlaku.

c) Výkon a příkon ventilátoru

Výkon ventilátoru je dán součinem průtoku a celkového dopravního tlaku[3]

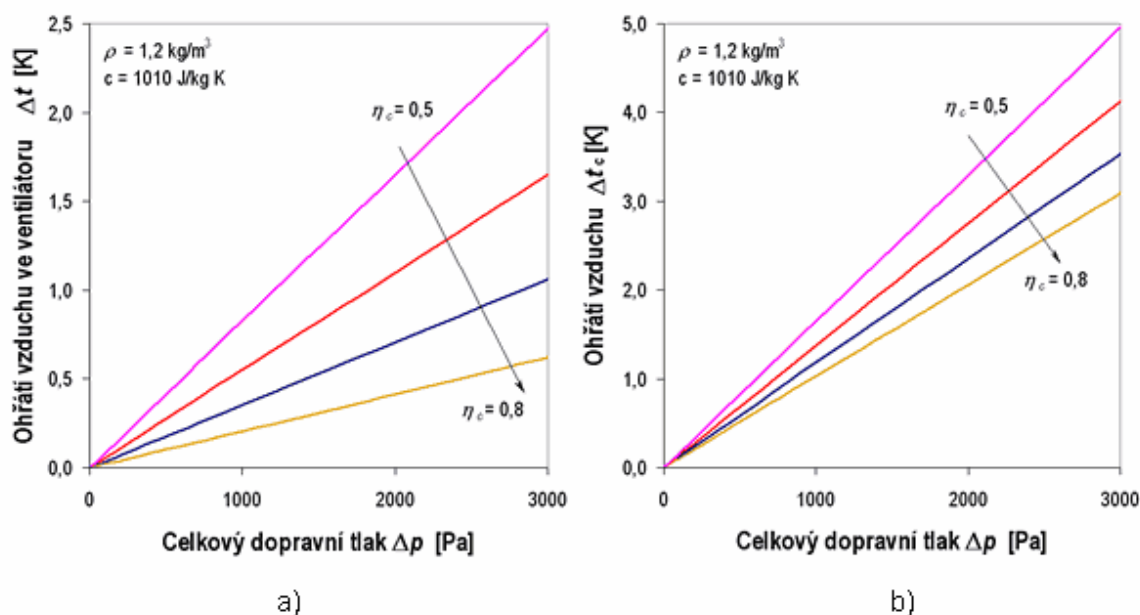
$$P = Q_v \Delta p \quad (2.1)$$

Příkon ventilátoru se stanoví z výkonu ventilátoru P a celkové účinnosti η_c , která je definována jako poměr mezi výkonem a příkonem ventilátoru.[3]

$$p_p = \frac{P}{\eta_c} \quad (2.2)$$

d) Ohřátí vzduchu ve ventilátoru

Při ohřátí vzduchu ve ventilátoru jde o rozdíl teploty na sání a výtlaku ventilátoru. Ohřátí vzduchu pro nízkotlaké a středotlaké ventilátory je znázorněno na obrázku(2.6). Je zřejmé, že pro nízkotlaké ventilátory nehraje ohřátí vzduchu výraznou roli, s vyšším dopravním tlakem však rozdíl teplot lineárně roste. [3]. Dále obrázek (2.6-a) představuje ohřátí vzduchu při průchodu ventilátorem a obrázek (2.6-b) závislost ohřátí vzduchu v potrubní síti ventilátorem.



Obrázek 2.6 Ohřátí vzduchu ve ventilátoru

e) Rozměry ventilátorů

Rozměry ventilátorů jsou udávány standardně (Šířka x Výška x Tloušťka) [mm].

f) Napětí (Střídavý proud / stejnosměrný proud)

Pro stejnosměrné napětí AC (5,12,24,48) [V].

Pro střídavé napětí DC (115V a 230) [V].

g) Systém uložení

Ložiska ventilátorů mají hlavní vliv na životnost ventilátoru. Dle ložisek lze dělit uložení na :

Uložení s kluzným ložiskem

Nízko nákladové řešení u něhož se doba životnosti pohybuje ve středních hodnotách. Použití těchto ventilátorů by mělo být ve vertikální poloze. Ventilátory s kluzným ložiskem vykazují nízkou hlučností, které ovšem s časem narůstá.

Uložení s kuličkovým ložiskem

Ventilátory s kuličkovými ložisky mohou být používány jak vertikálně tak horizontálně na rozdíl od ventilátoru s kluznými ložisky. Ventilátory s kuličkovými ložisky vypovídají vysokou životností a možností použití v oblasti vyšších teplot.

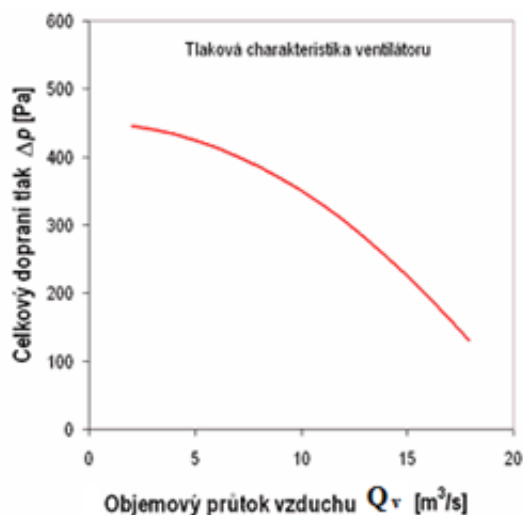
h) Hlučnost

Měření hlučnosti ventilátorů se provádí uvnitř bezdozvukové komory (odhlučněná místnost), ve které je mikrofón vzdálen 1 metr od ventilátoru. Jednotka hlučnosti je [dB].

Charakteristiky ventilátorů

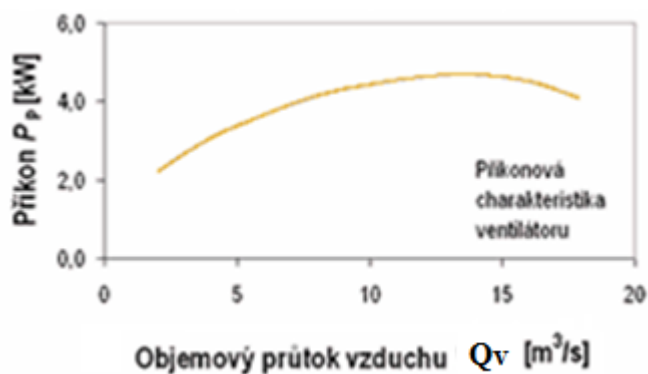
Na obrázcích (2.7; 2.8; 2.9) jsou znázorněny obecné charakteristiky ventilátoru, mezi něž patří:

- tlaková charakteristika - $\Delta p = f(Q_v)$
- příkonová charakteristika - $P_p = f(Q_v)$
- účinnostní charakteristika - $\eta_c = f(Q_v)$

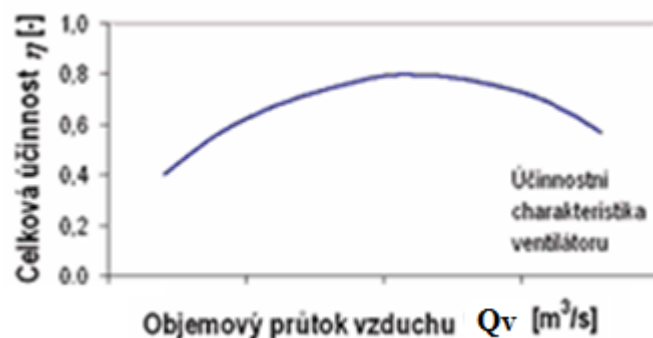


Obrázek (2.7) tlaková charakteristika ventilátoru $\Delta p = f(Q_v)$ [3]

Na obrázku (2.7) je zobrazena tlaková charakteristika ventilátoru, která udává závislost celkového dopravního tlaku Δp na objemovém průtoku vzduchu Q_v .



Obrázek (2.8) příkonová charakteristika ventilátoru $P_p = f(Q_v)$ [3]



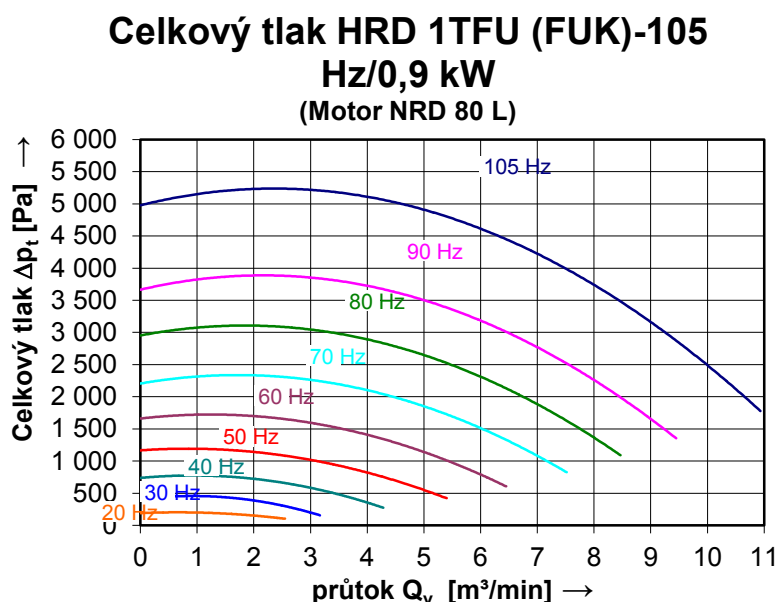
Obrázek (2.9) účinnostní charakteristika ventilátor $\eta_c = f(Q_v)$ [3]

Na obrázcích (2.8, 2.9) je zobrazena příkonová a účinnostní charakteristika ventilátoru, která udává závislost celkové účinnosti a příkonu na objemovém průtoku vzduchu Q_v .

Charakteristické křivky jsou určeny měřením a výrobce je udává v katalogovém listu ventilátoru. Obvykle jsou vlastnosti ventilátorů udávány pro určitý stav vzduchu ($\rho=1,2\text{kg/m}^3$).

2.3 Charakteristika měřeného ventilátoru typ HRD FU/FUK

V této kapitole je popsán ventilátor, který byl použit při praktickém měření. Jedná se o modelovou řadu HRD FU/FUK pro frekvenční měnič. Ventilátor je osazen vysokootáčkovým elektromotorem (105Hz), který dosahuje až 6200 otáček/min. Při řízení tohoto ventilátoru s pomocí frekvenčního měniče odpadá mechanická převodovka na ventilátoru, což velmi výrazně snížilo pořizovací cenu a dává uživateli vysoký komfort a ekonomii provozu. Frekvenční měnič umožňuje plynulou změnu otáček asynchronních motorů v rozsahu 0-100%. Označení FU znamená, že frekvenční měnič je umístěn mimo elektromotor ventilátoru. V případě FUK je frekvenční měnič kompaktní součástí elektromotoru.[4]



Obr. 2.10 Grafické zobrazení závislosti celkového tlaku na výkonu[4]

Na obrázku (2.10) je zobrazena závislost celkového dopravního tlaku Δp na objemovém průtoku ventilátoru při různých frekvencích nastavených pomocí frekvenčního měniče.

3 Teorie měření průtoku plynů

Měření průtoku a proteklého množství plynu se realizuje pomocí mnoha měřících systémů pracujících na různých fyzikálních principech.

Metody měření průtoku jsou založeny v podstatě na určování střední rychlosti proudění nebo na určení objemu popř. hmotnosti proteklé tekutiny v určitém časovém intervalu.

Každý měřicí systém se vyznačuje specifickými přednostmi i nedostatky, které pak mohou být rozhodující při volbě kritérií pro výběr měřidla. Zajímavé jsou například takové měřicí systémy, které neobsahují pohyblivé části, mohou pracovat v libovolné poloze, mají lineární charakteristiku, velký měřicí rozsah (poměr $Q_{min} : Q_{max}$) apod [1]

Základní rozdělení průtoků

V technické praxi se můžeme setkat s dvěma definicemi průtoku (objemový a hmotnostní průtok). Pro každou definici existuje mnoho měřidel pracujících na různých principech s různou přesností měření .

Objemový průtok

Q_v vyjadřuje objem tekutiny který proteče potrubím za čas t v $[m^3 \cdot s^{-1}]$. $Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ (3.1)

Hmotnostní průtok

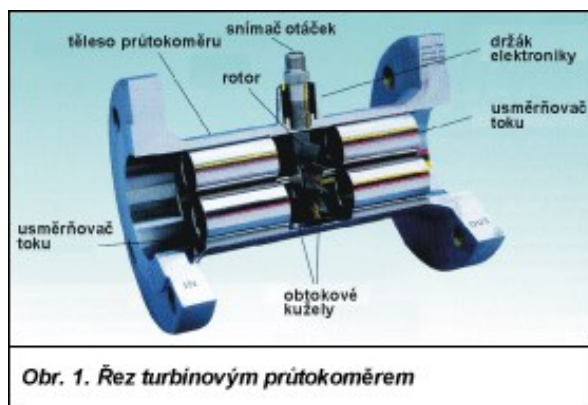
Q_m vyjadřuje hmotnost tekutiny, která proteče potrubím za určitý čas t . $Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$ (3.2)

3.1 Rychlostní průtokoměry

Základní prvek rychlostního průtokoměru je lopatkové (turbínové) kolo, které je uvedeno k rotačnímu pohybu kinetickou energií proudícího média rychlostní průtokoměry využívají závislosti dynamického tlaku proudící kapaliny na rychlosti proudění. Dělí se na : turbínové průtokoměry, vírové průtokoměry a ultrazvukové snímače průtoku.

Turbínový Průtokoměr

Jejich základem je volně otočný rotor s lopatkami. Rotor se vlivem proudění tekutiny otáčí, kdy otáčky jsou úměrné rychlosti proudění tekutiny. Otáčky bývají snímány bezdotykovým indukčním snímačem, kdy výstupem jsou napěťové impulsy, které se dále zpracovávají a vyhodnocují. Výhodou turbínkových průtokoměrů je použití v širokém rozsahu měřených rychlostí, reprodukovatelnost měření i krátkodobá přesnost.

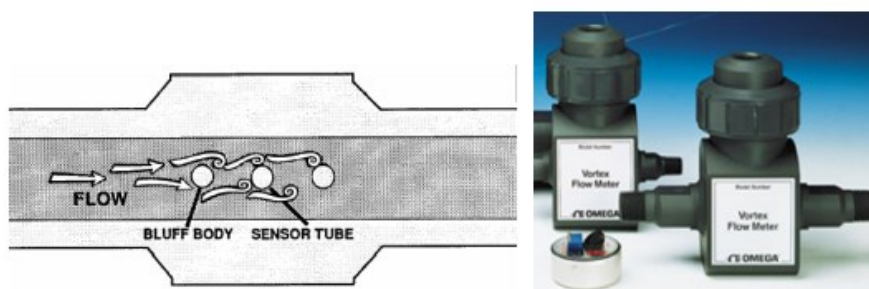


Obr. 3.1 řez turbínového průtokoměru [13]

Většinou se používají pro měření průtoku vody. Nevýhodou je, že je nelze použít u tekutin, které při proudění v potrubí víří, a nejsou doporučovány ani pro tekutiny s vysokou hodnotou viskozity. Protože turbínkové průtokoměry obsahují pohyblivé části, jsou náchylné na opotřebování a na usazování nečistot.

Vírový průtokoměr

Vírové průtokoměry jsou založeny na von Karnamově efektu, kdy po stranách překážky neaerodynamického tvaru, která je obtékána tekutinou, se střídavě na obou stranách oddělují víry, které vytvářejí tzv. von Karmanovou stezku. Frekvence vzniku vírů je v určitém rozsahu hodnot Reynoldsova čísla úměrná rychlosti proudění tekutiny, a proto i velikosti průtoku. [8]

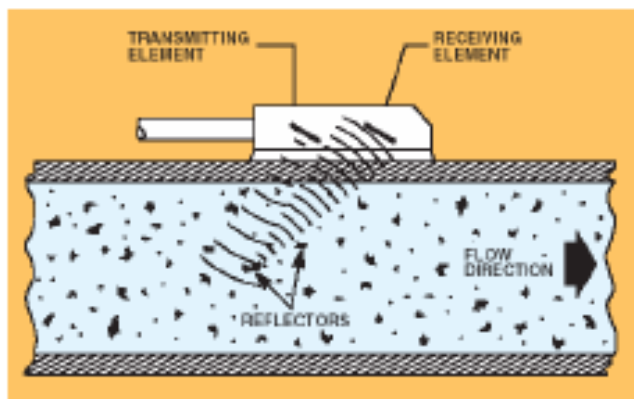


Obr. 3.2 Vírový průtokoměr [12]

Ultrazvukové snímače průtoku

Ultrazvukové průtokoměry používají pro měření rychlosti proudění tekutiny v potrubí ultrazvukového vlnění. Přístroje, které využívají Dopplerova principu, vysílají do tekutiny ultrazvukové vlny s konstantní frekvencí a přijímají vlnění odražené od pevných částic nebo od bublin rozptýlených v tekutině. Vzhledem k pohybu částic nebo bublin s tekutinou, je frekvence přijatého ultrazvukového vlnění odlišná od frekvence vyslané vlny. Rozdíl frekvencí je pak úměrný rychlosti proudění tekutiny.

Druhým typem ultrazvukových průtokoměrů jsou přístroje založené na principu měření doby průchodu médiem. [12]



Obrázek 3.3 Princip ultrazvukového snímače průtoku[12]

Tyto průtokoměry se skládají ze dvou vysílačích/přijímacích jednotek, které jsou umístěné za sebou ve směru proudění. Jeden z vysílačů vysílá ultrazvukový snímač po směru proudění a druhý proti směru proudění. Rozdíl mezi dobou průchodu obou signálů k druhé jednotce je úměrný rychlosti proudění tekutiny. Na rozdíl od průtokoměrů založených na Dopplerově principu, tyto ultrazvukové průtokoměry měří pouze rychlost proudění čistých tekutin. [8]

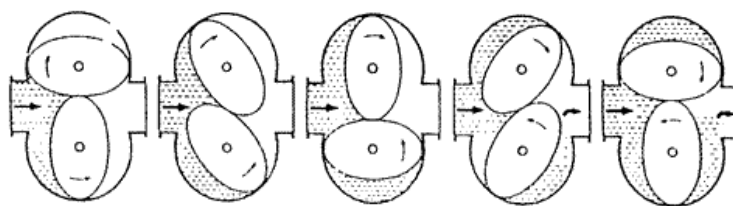
3.2 Objemové průtokoměry

Měření s vysokou třídou přesnosti. Existuje několik způsobů měření lišící se konstrukcí a metodou měření. Tyto měřiče měří objem tekutiny přímo jeho rozdělením do samostatných odměrných prostor se známým objemem. Vynásobením počtu postupně naplněných odměrných prostorů objemem každého z nich získáme hodnotu proteklého objemu. Měří se vždy určitou dobu a výsledkem měření je hodnota s rozměrem jednotek objemu za jednotku času. Objemové průtokoměry často na počítadle ukazují celkový proteklý objem, ale umožňují také generovat výstupní pulzy, přičemž každý pulz reprezentuje určitý objem tekutiny. Počty pulzů mohou být odečítány z lokálního displeje nebo přenášeny do řídicího systému. Vzhledem k tomu, že objemové průtokoměry není možné spolehlivě utěsnit, jsou všeobecně nevhodné k měření průtoku plynů.

Jako mechanická zařízení s mnoha pohyblivými částmi nejsou dávkovací průtokoměry vhodné k měření znečištěných kapalin a kapalin obsahujících pevné částice. Navíc kapalině odebírají část její kinetické energie a způsobují trvalou tlakovou ztrátu.[9]

Oválný průtokoměr

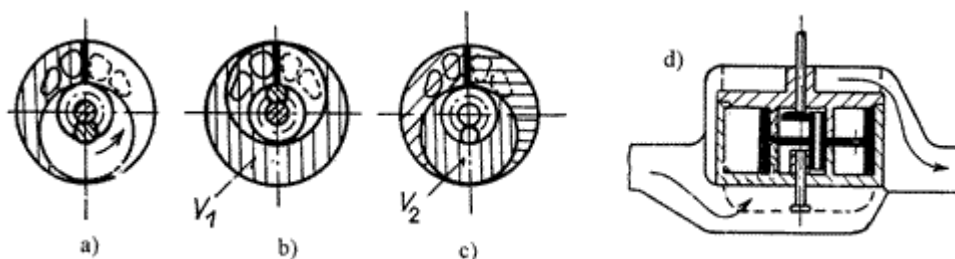
V průmyslu velmi rozšířený způsob měření průtoku, zejména velmi viskózních tekutin. V precizně vyrobené komoře se pohybují dvě oválná tělesa opatřená ozubením po obvodu každého z nich (obr. 3.4). Ozubení je vyrobeno velmi přesně s minimální vůlí a tolerance jednotlivých rozměrových řetězců na sebe úzce navazují. Odměrné komory oválného měřidla průtoku se střídavě plní a vyprazdňují a počet otáček oválných těles je úměrný proteklému množství tekutiny, pokud známe přesný objem odměrného prostoru v tělese. Oválná měřidla mají vyšší tlakovou ztrátu, která silně závisí na velikosti tření v ložiskách, dynamické viskozitě a hustotě měřeného média. [9]



Obrázek 3.4 princip Oválného průtokoměru [9]

Vodoměr s krouživým pístem

Základní částí je odměrná komora, která je rozdělena přepážkou na dvě části (obr. 3.5). V jejím dně jsou vyvrtány vstupní otvory, v horní části výtokové otvory. Prstenec pístu, který se pohybuje v odměrné komoře, je přerušen výřezem, do kterého zapadá přepážka komory, umožňující pístu konat smýkavý pohyb. Od pohybu středu pístu je odvozen pohyb počítadla otáček, jehož údaj je úměrný proteklému objemovému množství kapaliny přístrojem. [9]



Obrázek 3.5 princip Oválného průtokoměru [9]

Tekutina prochází při činnosti přístroje vstupními otvory ve spodní části odměrné komory a její tlak otáčí pístem. Zaplněním vnějšího odměrného prostoru V1 dojde k odměření přesného objemu.

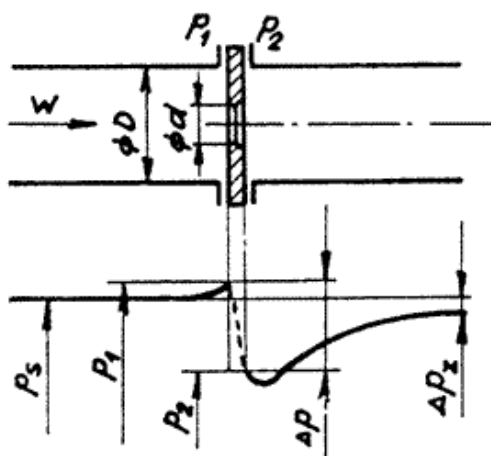
Dalším otáčením se odkryjí výtlačné otvory, odměřená kapalina odchází do prostoru vně pístu a zároveň vstupními otvory do odměrného prostoru proudí nová odměřovaná tekutina. celý měřicí cyklus se neustále opakuje. Otáčivý pohyb středu pístu je mechanicky převáděn na převodové ústrojí počítadla, nebo elektricky snímán přístrojem.[9]

3.3 Průtokoměry s měřením rozdílů tlaků

Většina měření průtoků je založena na principu měření tlakové difference. Patří sem například clona, dýza, Venturiho trubice, Pitotova trubice, Prandtlova trubice.

Clona

Clona je v podstatě plochá kovová deska s otvorem, která je vložena do potrubí mezi příruby. Průměr škrticího otvoru a jeho umístění závisí na typu měřené tekutiny. Odběry statických tlaků jsou prováděny těsně před a za deskou, kdy existují dva základní typy odběrů - koutové odběry a přírubové odběry. Mezi základní typy clon patří clona soustředná (normalizovaná), excentrická a segmentová. Průtokoměry se škrticí clonou jsou robustní a i při velkých průměrech potrubí jsou relativně levné. Clonou lze měřit průtok většiny čistých tekutin. Dále je z obrázku (3.6) patrný průběh tlaků skrz clonu.

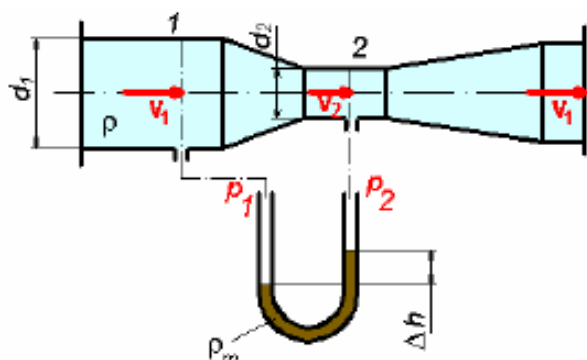


Obrázek 3.6 Princip fungování clony [9]

Aby se dosáhlo požadovaných vlastností, musí být clona zabudována do přímého úseku potrubí s předem definovanými uklidňujícími úseky před a za clonou (uklidňující potrubí před a za průtokoměrem je udáváno u všech typů průtokoměrů, ovšem u normalizované clony bývají tyto úseky jedny z nejdelších).[12]

Venturiho trubice

U Venturiho trubice (Obr. 3.7) je tekutina zrychlena v kuželovém konfuzoru, což opět vyvolá místní pokles statického tlaku. V následující části trubice, difuzoru, se tlak téměř vrací na úroveň tlaku před zúžením. Výhodou venturiho trubice je menší tlaková ztráta než u clony a velká přesnost měření. Nevýhodou je poměrně vysoká cena, proto se Venturiho trubice využívá velmi málo. Příčinou rozdílné výšky rtuti je různý tlak vzduchu nad její hladinou. V levém rameni je tlak vzduchu p_1 vyšší a v pravém rameni je tlak vzduchu (p_2 nižší) [12]



Obrázek 3.7 princip Venturiho trubice [12]

Následně pak pro průřezy 1 a 2 platí Bernoulliho rovnice

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \Rightarrow \frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (3.3)$$

kde p_1, p_2 jsou tlaky vzduchu. Následně pak platí rovnice kontinuity.

$$v_1 S_1 = v_2 S_2; \quad (3.4) \quad v_1 d_1^2 = v_2 d_2^2 \Rightarrow v_2 = v_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (3.4)$$

Pro diferenciální manometr platí, že rozdíl tlaků je určen vztahem:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = g \Delta h (\rho_m - \rho) \quad (3.5)$$

Dosazením vztahu pro tlakovou diferenci a rychlost v_2 do Bernoulliho rovnice dostaneme výraz pro střední rychlost v_1

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{v_1^2}{2} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - \frac{v_1^2}{2} \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right]} \frac{\rho_m - \rho}{\rho}} = K_v \sqrt{\Delta h} \quad (3.6)$$

Pro průtok Q platí vztah:

$$Q = v_1 S_1 = v_1 \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi d_1^2}{4} \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right]} \frac{\rho_m - \rho}{\rho}} = K_Q \sqrt{\Delta h} \quad (3.7)$$

Při průtoku skutečné tekutiny bude následkem hydraulických odporů skutečná rychlost menší. Tento vliv se zahrne v součinitelích K_v, K_Q . Praktické provedení Venturiho trubice se provádí podle ČSN ISO 5167-1, kde jsou uvedeny hodnoty součinitelů K_v, K_Q v závislosti na zúžení $m = S_1/S_2$ a velikosti Reynoldsova čísla Re .

3.4 Hmotnostního průtokoměry

Existuje relativně málo přímých metod měření hmotnostního průtoku. Dva základní principy jsou:

- Coriolisův průtokoměr
- Tepelný hmotnostní průtokoměr

Coriolisův průtokoměr

Tento průtokoměr využívá tzv. Coriolisovy síly, která vzniká ve vibrujících měřicích trubicích při průtoku hmotného média. Fázový posuv v rezonančním kmitání trubic, který vzniká jako důsledek působení Coriolisovy síly, je úměrný hmotnostnímu průtoku tekutiny trubicí a frekvence vlastních kmitů odpovídá hustotě tekutiny.

Coriolisovy průtokoměry měří hmotnostní průtok velice přesně a jejich údaj je v podstatě nezávislý na teplotě, tlaku, viskozitě, obsahu pevných částic v tekutině, atd. [12]



Obr.3.8 . Coriolisův průtokoměr[12]

Tepelný hmotnostní průtokoměr

Tepelný hmotnostní průtokoměr vychází ze závislosti výměny tepla mezi zdrojem a okolím, které tvoří proudící médium, na hmotnostním průtoku. Vyskytují se dva typy tepelných hmotnostních průtokoměrů:

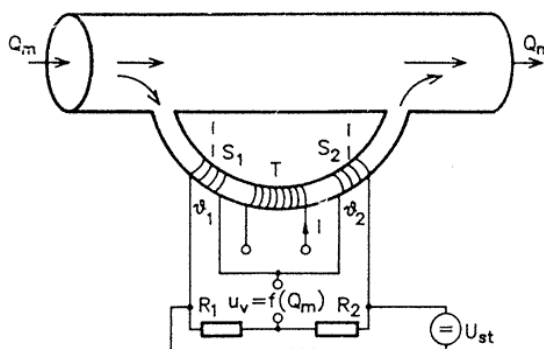
- a) termoanemometr
- b) Kalorimetrický Hmotnostní průtokoměr

Termoanemometr

Termoanemometr je elektricky vyhřívaná sonda, která je vložena do potrubí, ve kterém proudí tekutina. Množství tepla odebíraného na sondě tekutinou je závislé na rychlosti proudění, hustotě, tepelné vodivosti a na teplotě proudícího média, kterou je potřeba měřit. Čidlem termoanemometrů bývá platinový drátek o průměru 0,01 až 0,1 mm, který je žhavený na teplotu 200 až 500 °C. [12]

Kalorimetrický hmotnostní průtokoměr

Kalorimetrické průtokoměry mají zdroj tepla umístěn do středu proudového profilu a teplota se snímá před a za tímto zdrojem tepla. Průtok pak určujeme z rozdílu teplot. [12]



Obr. 3.9 Kalorimetrický hmotnostní průtokoměr[12]

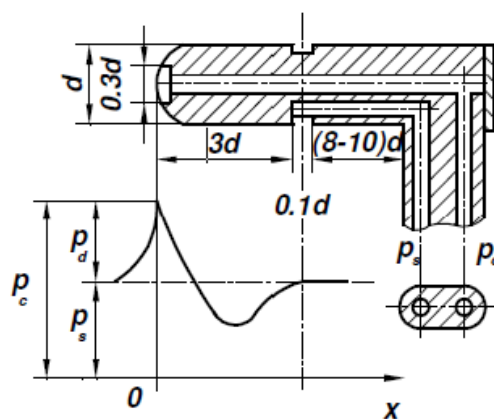
Kde: S1, S2 - odporové snímače teploty

T - Topné vinutí

3.5 Rychlostní sondy k měření střední rychlosti

Prandtlůva trubice

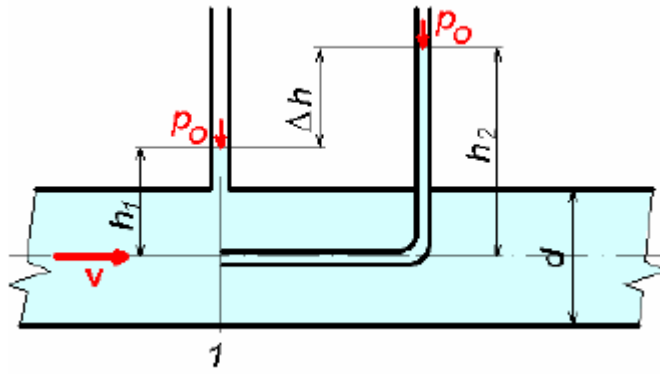
Prandtl navrhl trubici, u níž je odběr celkového i statického tlaku soustředěn v jednom měřidle (obr.3.10). Prandtlůva trubice je tvořena válcovým tělesem s parabolickým nebo půlkulovým ukončením. V ose trubice je otvor pro odběr celkového tlaku p_c , který je vyveden vnitřní trubicí. Statický tlak p_s se snímá v drážce nebo otvoru na plášti vnější trubice a je vyveden druhou trubicí. Aby tlak p_s byl roven tlaku nerušeného proudu, je odběr statického tlaku umístěn ve vzdálenosti rovnající se minimálně třem průměrům trubice od jejího ústí.



Obrázek 3. 10 Prandtlůva trubice [12]

Pitotova trubice

Je jednodušší variantou Prandtlůvy trubice, kdy statický tlak pro tlakovou diferenci je zpravidla atmosférickým tlakem okolí. Trubice měří rychlost proudění. Průtok se vypočte při zohlednění řady dalších komplementárních veličin, zejména rozměrů v měřeném profilu.



Obrázek 3.11 princip Pitotovy trubice [12]

Proudění kapaliny pro vodorovné potrubí popisuje Bernoulliho rovnice pro ideální tekutinu, která má tvar [12]

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{konst} = p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konst} = p_c \quad (3.8)$$

kde :

$$p_s + p_d = p_c \quad (3.9)$$

Kde p_s je statický tlak

p_d je tlak dynamický

$$p_d = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (3.10)$$

p_c je celkový tlak měřený pitotovou trubicí

z rozdílu tlaků

$$p_c - p_s = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (3.11)$$

Ize pro rychlost kapaliny v potrubí odvodit rovnici:

$$v = \sqrt{\frac{p_c - p_s}{\rho}} = \sqrt{2 \frac{p_d}{\rho}} = \sqrt{2g\Delta h} \quad (3.12)$$

Kde:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (3.13)$$

4 Měření tlaku

Fyzikální veličina, značená písmenem p vyjadřuje poměr velikosti síly F , působící kolmo na rovinnou plochu a rovnoměrně spojitě rozloženou po této ploše a obsahu této plochy S . Tlak vzduchu na povrchu země se nazývá barometrický tlak. Měříme-li tlaky od nulového tlaku, mluvíme o tlacích absolutních. Je-li absolutní tlak vyšší než barometrický, nazýváme uvedený rozdíl přetlakem, v opačném případě podtlakem.

Metody měření tlakové difference

- Tlakoměry kapalinové
- Deformační tlakoměry s elastickým členem
- Tlakoměry se silovým účinkem
- Tenzometrické snímače tlaku
- Piezoelektrické snímače tlaku

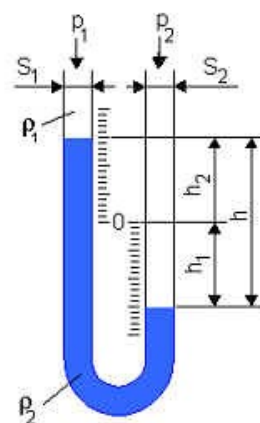
4.1 Kapalinové tlakoměry

Nejpoužívanější přístroje pro měření nižších tlaků díky své jednoduchosti a přesnosti. Změna tlaku je vyjádřena pomocí změny výšky tlakoměrné kapaliny, nejčastěji v přímé trubici ,patří sem například:

- U- trubicový tlakoměr,
- Nádobkový tlakoměr,

a) U – trubicový tlakoměr

Nejčastější tlakoměr pro svou jednoduchost. Základním prvkem těchto tlakoměrů jsou dvě skleněné trubice ohnuté do tvaru U, naplněné tlakoměrným médiem. Jsou-li p_1 a p_2 dva současně působící rozdílné tlaky ($p_1 > p_2$), pak rozdíl tlaků Δp je: [12]



Obr. 4.1 U-trubicový tlakoměr [14]

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h (\rho_m - \rho) g \quad (4.1)$$

- kde
- h je výška kapalinového sloupce [m]
 - ρ hustota měřené tekutiny [kg.m^{-3}]
 - ρ_m hustota měřící kapaliny [kg.m^{-3}]
 - g tíhové zrychlení [m.s^{-2}]

Je-li p_1 měřený tlak a p_2 tlak okolní atmosféry, měříme přetlaky (případně i podtlak):

$$\Delta p = h(\rho_m - \rho) g \quad (4.2)$$

b) Nádobkový tlakoměr

Jsou odvozeny z U-trubicových tlakoměrů. Jedno rameno tvoří nádoba, jejíž průměr je mnohem větší než průměr trubice, takže v něm hladina kolísá zcela nepatrně. Tlak se odečítá pouze na jedné stupnici. Trubice, pomocí které měříme výšku tlakoměrné kapaliny musí mít stálý průřez (musí být kalibrována). Pokles hladiny kapaliny v nádobce tlakoměru musí být zahrnut do stupnice tlakoměru. Schéma tlakoměru je na obr. (4.2) .[12]

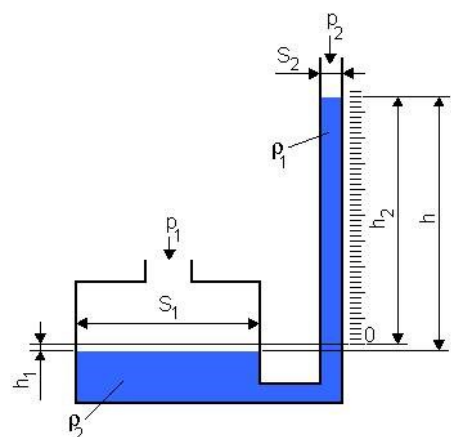
$$S_1 h_1 = S_2 h_2 \Rightarrow h_1 = h_2 \frac{S_2}{S_1} \quad (4.3)$$

Potom:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_m - \rho) g \cdot (h_1 + h_2) = (\rho_m - \rho) g h_2 \left(1 + \frac{S_2}{S_1}\right) \quad (4.4)$$

Kde

- h_2 je výška tlakoměrné kapaliny v trubici [m]
- ρ hustota měřené tekutiny [kg.m^{-3}]
- ρ_m hustota tlakové kapaliny [kg.m^{-3}]
- g tíhové zrychlení [m.s^{-2}]
- S_1 plocha (průřez) nádoby [m^2]
- S_2 plocha (průřez) trubice [m^2]



Obr. 4.2 nádobkový tlakoměr [14]

4.2 Další typy tlakoměrů

Pístový tlakoměr

Měřený tlak působí na píst vyvážený závažím nebo pružinou. Z velikosti vyvážení a z rozměrů pístu lze určit měřený tlak. Do této skupiny tlakoměrů patří tlakoměr pístový a zvonový. Jedná se o etalonový tlakoměr. U pístového tlakoměru je podstatnou součástí píst přesného průřezu, umístěný ve válci. Tlak na píst opatřený talířem se přenáší obvykle olejem, kterým je celý systém tlakoměru vyplněn. Velikost síly vzniklé působením měřeného tlaku na píst je kompenzována tíhou pístu a závaží. Rovnováha mezi silou závaží a tlakem oleje na píst nastane při zastavení pohybu pístu ve směru jeho osy. U provozního pístového tlakoměru je kompenzační síla vyvozována pružinou. Výhodou tohoto přístroje je, že lze potlačit libovolnou část rozsahu použitím přídatného závaží. Pro převod na elektrický signál je možno použít libovolného snímače tlakové síly. [12]

Deformační tlakoměr

Funkční princip deformačních tlakoměrů je využít pružné deformace, a tím i změny geometrického tvaru vhodných tlakoměrných prvků (čidel) při působení měřeného tlaku. Vzniklé deformace musí být výrazně pod mezí pružnosti, aby nenastala plastická deformace tlakoměrného prvku a tím i trvalé poškození měřidla. Významným jevem deformačních tlakoměrů je hystereze. Projevuje se při deformaci tlakoměrného prvku v povolených mezích.

Trubicový tlakoměr

Deformačním prvkem (čidlem) je Bourdonova trubice oválného, eliptického nebo jiného profilu, která je stočena do kruhového oblouku.

Jeden konec trubice je uzavřen. Otevřený konec trubice je upevněný a je do něho přiveden měřený tlak. Trubice se začne napřimovat vlivem působícího tlaku a vychýlí se její uzavřený konec.

5 Návrh experimentálního měření

Měření Charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati proběhlo na experimentální měřicí trati. V první fázi jsem provedl návrh experimentální vzduchové měřicí trati. Následně byla experimentální trať složena ve školní laboratoři mechaniky tekutin v místnosti E – 306 katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení. Na této trati následně proběhlo praktické měření charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati ovládaného pomocí frekvenčního měniče.

Způsoby měření průtoku vzduchu na měřicí trati

K měření průtoku vzduchu na vzduchové trati jsem použil digitální průtokoměr pracující na principu žárového anemometru, kde se proudem vzduchu ochlazuje zahřáté těleso uvnitř průtokoměru. Více o tomto druhu měření průtoku viz. kapitola (3.4). Byl použit typ SD 9000 od firmy IFM.

Způsob měření tlaku na měřicí trati

Pro měření tlaku na vzduchové trati jsem použil digitální převodník tlaku typ Almemo FD8612DPS od Firmy AHLBOR. Tento typ převodníku měří hodnotu tlaku v rozmezí (0 až 2,5 bar).

V praktickém měření byl tlak vyšší než 2500 [Pa] byl proto nutný převodník Almemo typ FD A602-S6K, taktéž od firmy AHLBOR, jehož měřicí rozsah se pohybuje v rozmezí 0 – 6800 [Pa].

Způsob měření na experimentální vzduchové trati

Měření proběhlo pro nastavení ventilátoru pro rozsah frekvence (10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 Hz). Všechny měřené hodnoty byly odečítány z digitálního průtokoměru a digitálních převodníků tlaku Almemo FD A602-S6K a Almemo FD8612DPS. Naměřené a počítané hodnoty pro rozsah frekvence (10 ÷ 100) Hz pro plně otevřený kulový ventil, jsou uvedeny v tabulce (7.1). Všechny vypočtené hodnoty byly zpracovány pomocí software Microsoft office excel 2010. Pro každou hodnotu frekvence byla v 8 krocích měněna poloha plastového kulového ventilu a tím byl regulován průtok z ventilátoru.

Návrh vzduchové měřicí trati

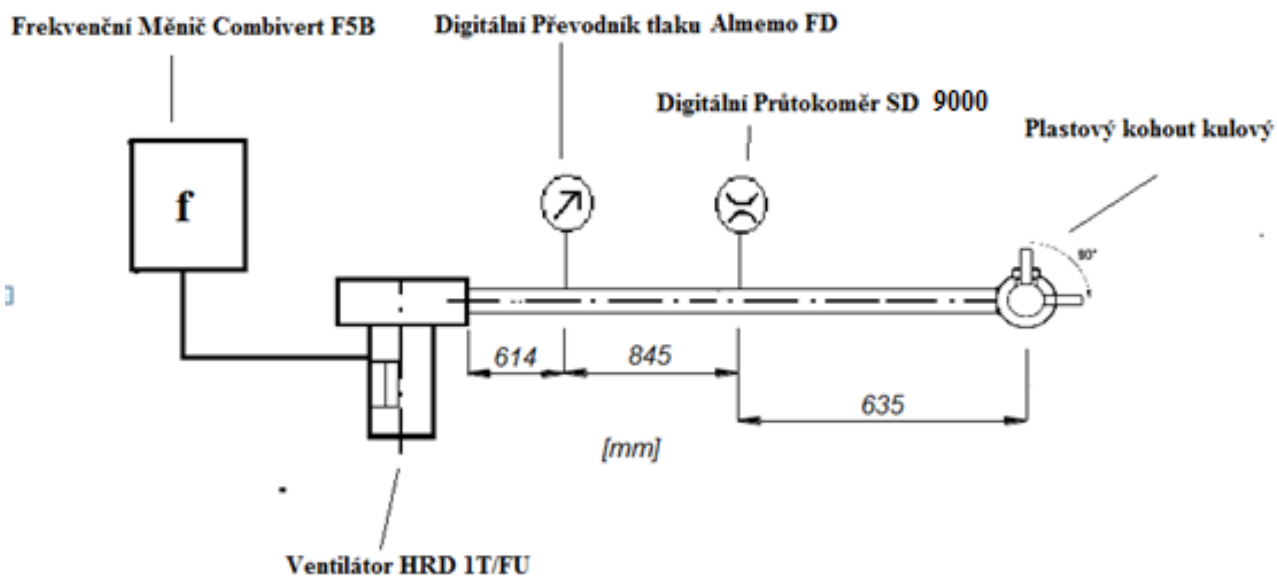
V první fázi byla navržena a poté sestavena jedna měřicí trať na které proběhlo praktické měření charakteristiky ventilátoru. Měřicí trať obsahovala ventilátor poháněný elektromotorem, který je ovládán pomocí frekvenčního měniče. Měření průtoku bylo realizováno digitálním průtokoměrem SD 9000 a měření tlaku pomocí digitálního převodníku tlaku .

Popis měřicí vzduchové trati

Sestavení experimentální tratě proběhlo na pracovním stole, na které probíhají měření na vzduchové trati. Na stole již byl uchycen ventilátor s elektromotorem (Obr. 6.1) a na zdi připevněný frekvenční měnič (Obr. 6.2). Na výstup z ventilátoru bylo upevněno plastové potrubí světlosti 50 mm (Obr.6.9). Ve vzdálenosti uvedené na schématu experimentální trati (obr.5.1) byl upevněn kroužek pro odběr tlaku.

Poté byl třemi plastovými hadičkami propojen výstup tlaku do digitálního převodníku typ Almemo FDA602-S6K (Obr.6.5), tlak byl zobrazen pomocí vyhodnocovacího zařízením Almemo typ 2290-3 (Obr. 6.4). Za kroužkem (Obr.6.8) bylo připevněno další potrubí o světlosti 50 mm viz.(obr.6.9), na konci potrubí byl umístěn digitální průtokoměr SD 9000 (Obr.6.3), který byl napájen zdrojem 24 V.

Za digitální průtokoměr pokračovalo potrubí o světlosti 50 mm a na konec této trati byl umístěn plastový kohout kulový (Obr. 6.7), kterým se reguloval průtok vzduchu z ventilátoru. Tento kulový ventil byl v průběhu měření 8x přiškrcen až do hodnoty nulového průtoku.



Obr. 5.1 Schéma Experimentální měřicí trati



Obr 5.2 Skutečná sestava Experimentální Měřicí trati

6 Specifikace prvků a měřidel

Podklady pro specifikaci jednotlivých prvků jsou čerpány z podkladů od jednotlivých výrobců umístěných na webových stránkách.

Experimentální měřicí trat se skládá z těchto prvků:

- Ventilátor s elektromotorem HRD 1T/FU
- Frekvenční měnič Combivert F5B – Basic
- Digitální průtokoměr SD 9000
- Vyhodnocovací zařízení Almemo 2290-3
- Digitální převodníky tlaku Almemo typ FD A602-S6K a FD8612DPS

- Plastový kohout kulový
- Kroužek pro odběr statického tlaku
- Potrubí světlosti 50 mm

Ventilátor s elektromotorem

Typ.....HRD 1T/FU - 105Hz
 Firma.....Energoekonom
 Tlak.....4900 [Pa]
 Průtok.....11 m³·min⁻¹
 Výkon.....900 W
 Napětí.....230/400 V
 Frekvence ventilátoru.....105 Hz
 Otáčky.....6200 min⁻¹



Obr. 6.1 Ventilátor s elektromotorem [4]

Frekvenční měnič

Typ.....Combivert F5B – Basic
 Firma.....Karl E. Brinkmann GmbH
 Výkon.....750 W
 Napájení.....3 x 400 V



Obr. 6.2 Frekvenční měnič

Digitální průtokoměr

Typ.....SD 9000
 Firma.....IFM electronic
 Rozsah.....1.3÷410 [Nm³/h]
 Zobrazená přesnost.....1 [dm³min⁻¹]
 Přesnost.....1-3 %



Obr. 6.3 Digitální průtokoměr [15]

Zobrazovací a vyhodnocovací zařízení

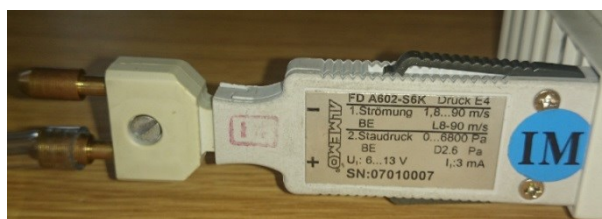
Typ..... Almemo 2290-3
Firma..... AHLBOR GmbH
Napájení..... 9 [V]
Vstupy.....2x analogový vstup
Výstupy.....2x analogový výstup



Obr. 6.4 Vyhodnocovací zařízení

Digitální převodníky tlaku

Typ.....Almemo FD A602-S6K
Firma.....AHLBOR GmbH
Měřicí rozsah... ..0 ÷ 6800 Pa
Výstup.....1 x analogový [6 - 13 V]
Přesnost.....0,5 %



Obr. 6.5 Digitální převodník tlaku

Digitální převodník tlaku

Typ.....Almemo FD8612DPS
Firma.....AHLBOR GmbH
Měřicí rozsah.....[0 až 2,5 mbar až 0 až 1000 mbar]
Výstup.....analogový (0 ÷ 10 V)
Napájecí napětí..... 6 V
Přesnost:1 %
Rozměry.....120 x 80 x 55 mm



Obr. 6.6 Digitální převodník tlaku

Plastový kohout kulový

Firma..... FV-Plast
Světlost..... 50 mm
Materiál..... PVC



Obr. 6.7 Plastový kohout kulový

Kroužek k odběru statického tlaku

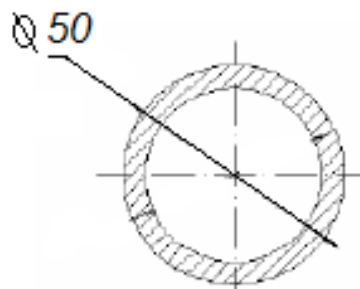
Materiál..... PVC
Světlost.....50 mm
Firma..... FV-Plast



Obr. 6.8 Kroužek pro odběr statického tlaku

Potrubí

Materiál..... PVC
Světlost.....50 mm
Firma.....FV-Plast



Obr. 6.9 Průřez potrubím

7 Postup měření na experimentální trati

Měření probíhalo v místnosti E-306 katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení. Sestavená experimentální měřicí trať je zobrazena na obrázku (5.2). Po sestavení experimentální měřicí trati následovalo praktické měření. Plastový kulový kohout viz. (Obr.6.7), který byl zapojen na výstup měřicí tratě jsem nastavil do polohy plně otevřeno. Poté jsem nastavil frekvenci ventilátoru pomocí frekvenčního měniče (Obr. 6.2), který spustil ventilátor (Obr. 6.1). Při prvním měření jsem nastavil frekvenci 10 Hz která určuje otáčky ventilátoru. Poté jsem odečetl hodnotu tlaku p [Pa] z digitálního převodníku tlaku a určil tak první relativní tlak na výstupu z ventilátoru. Z digitálního průtokoměru (Obr.6.3) jsem poté odečetl hodnotu průtoku v normálních metrech krychlových pro plně otevřený kulový ventil. Stejně jsem postupoval v každé z 8 poloh uzavření ventilu. Následně byl proveden přepočet průtoku Q_{vN} [Nm^3/h] na pracovní podmínky při měření (viz. kapitola 8). Po zapsání prvních dvou hodnot, do předem připravené tabulky jsem přiškrtl plastový kulový ventil a postupoval jako v předešlém případě a odečetl hodnotu, tlaku a průtoku. Poté jsem plastový kruhový ventil v 8 krocích uzavíral až do téměř nulového průtoku, a při každé poloze kulového ventilu jsem opět odečetl hodnoty tlaku p [Pa] z digitálního převodníku tlaku a průtok Q_v [Nm^3/h] z digitálního průtokoměru a zapisoval je do předem připravené tabulky (viz Tab.7.1, Tab.7.2.). Takto jsem postupoval při všech frekvencích 10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 Hz. Pro vytvoření tabulek, vyhodnocení a vykreslení grafů byl použit software Microsoft office Excel 2010.

Naměřené hodnoty				Vypočtené Hodnoty			
Č.Měření	f[Hz]	p ₁ [Pa] relativní	Q _v [Nm ³ /h]	p[Pa] aboslutní	Q _v [Nm ³ /s]	Q _v [m ³ /h]	Q _v [m ³ /s]
1	10	62,4	14	101325,1	0,0039	15,1276	0,0042
2	20	122,4	28,5	101447,4	0,0079	30,7583	0,0085
3	30	318,5	42	101643,5	0,0117	45,2405	0,0126
4	40	593,2	56,5	101918,2	0,0157	60,6953	0,0169
5	50	950,4	70,5	102275,4	0,0196	75,4703	0,021
6	60	1383,4	86	102708,4	0,0239	91,6750	0,0255
7	70	1951,3	100	103276,3	0,0278	106,0126	0,0294
8	80	2584	115,5	103909	0,0321	121,6990	0,0338
9	90	3253	130	104578	0,0361	136,1010	0,0378
10	100	4012	143,5	105337	0,0399	149,1520	0,0414

Tabulka 7.1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro plně otevřený kulový ventil

V tabulce (7.1) jsou uvedeny naměřené hodnoty pro plně otevřený kulový ventil (tlak p[Pa] a průtok Q_{vN} [Nm³/h], odečítané z digitálního průtokoměru a digitálního převodníku tlaku). Vypočtené hodnoty představují: Absolutní tlak p [Pa] a průtok Q_v [m³/h]; [m³/s]; [Nm³/s].

Naměřené hodnoty				Vypočtené Hodnoty			
Č.Měření	f[Hz]	p ₁ [Pa] relativní	Q _v [Nm ³ /h]	p[Pa] Absolutní	Q _v [Nm ³ /s]	Q _v [m ³ /h]	Q _v [m ³ /s]
1	10	93	11	101418	0,0031	11,8751	0,0033
2	20	214	20,5	101539	0,0057	22,1044	0,0061
3	30	424	30,5	101749	0,0085	32,8192	0,0091
4	40	718	40,5	102043	0,0113	43,4540	0,0121
5	50	1099	50,5	102424	0,0140	53,9819	0,015
6	60	1535	61,5	102860	0,0171	65,4616	0,0182
7	70	2098	71	103423	0,0197	75,1622	0,0209
8	80	2717	81,5	104042	0,0226	85,7644	0,0238
9	90	3436	93,5	104761	0,0260	97,7170	0,0271
10	100	4243	103,5	105568	0,0288	107,3412	0,0298

Tabulka 7.2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro první polohu kulového ventilu .

V tabulce (7.2) jsou uvedeny hodnoty tlaku p[Pa] a průtoku Q_{vN} [Nm³/h] pro 1. polohu kulového ventilu, odečítané z digitálního průtokoměru a digitálního převodníku tlaku. Vypočtené hodnoty představují: absolutní tlak p [Pa] a průtok Q_v [m³/h]; [m³/s]; [Nm³/s].

8 Vyhodnocení praktického měření

Obecný postup měření a výpočtu

Průtok byl měřen pomocí digitálního průtokoměru SD 9000 viz. (Obr.6.3), který měřil hodnotu průtoku v [Nm^3/h]. Následně byl nutný přepočet průtoku Q_v na pracovní podmínky. Přepočet objemového průtoku Q_{vN} [Nm^3/h] z normálních podmínek na provozní podmínky je popsán níže. Dále jsem měřil relativní tlak p_1 [Pa], který jsem přičetl k atmosférickému tlaku a stanovil tak tlak absolutní, potřebný do přepočtu objemového průtoku.

$$p = p_1 + p_0 \quad (8.1)$$

přepočet průtoku Q_v :

$$Q_{v1} = Q_{vN} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_N}{p} \quad (8.2)$$

kde :

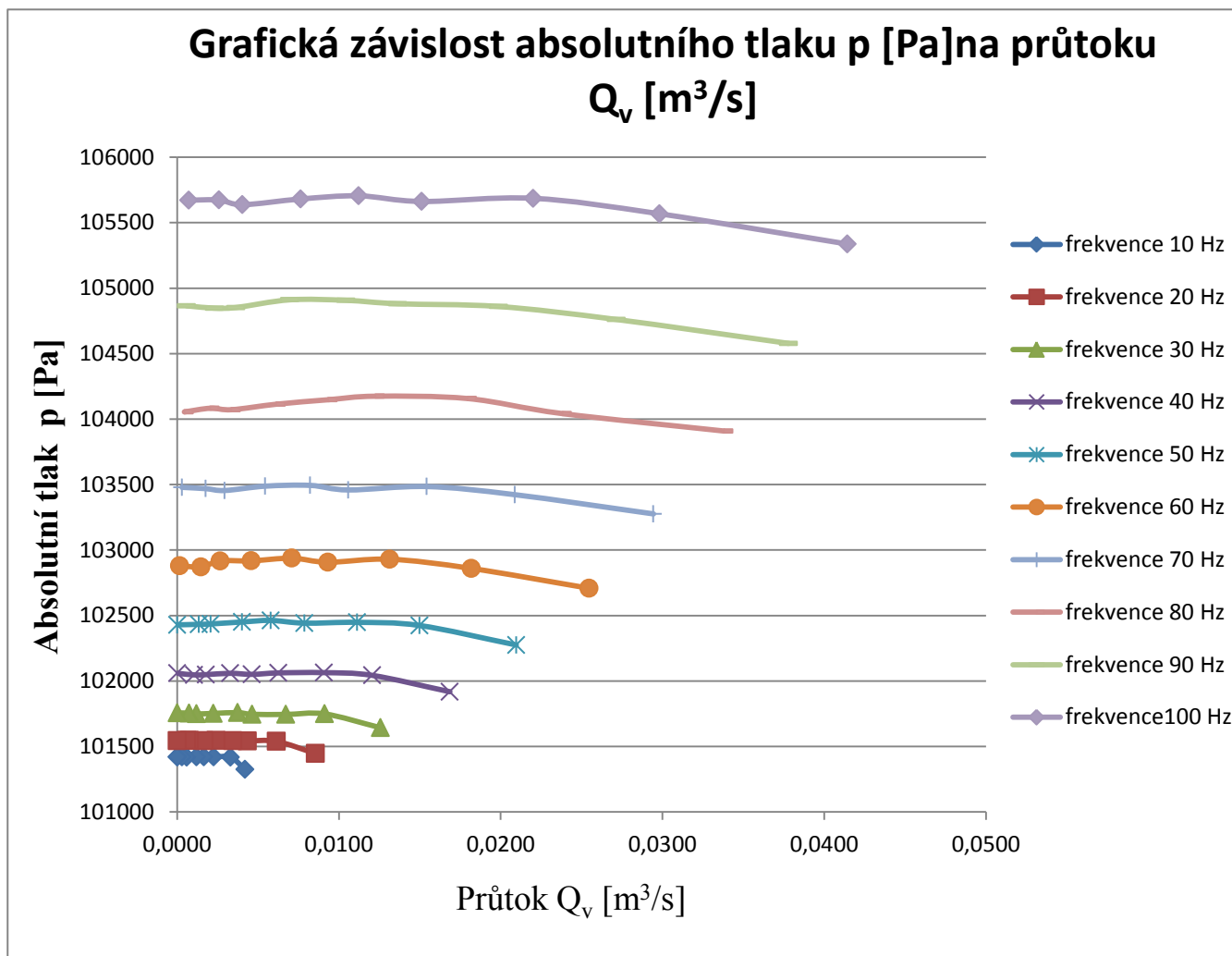
Q_{vN} – objemový průtok za normálních podmínek	[Nm^3/h]
T – teplota okolí při měření (22 °C)	295,15 [$^{\circ}\text{K}$]
p_N – normální tlak	101 325 [Pa]
T_N – normální teplota	273,15 [$^{\circ}\text{K}$]
p - absolutní Tlak	$p = p_N + p_1$

Ukázka výpočtu pro měření č.2 viz tabulka (7.1) pro plně otevřený ventil

$$p = p_N + p_1 = 101325 + 122,4 = 101447,4 \text{ [Pa]} \quad (8.3)$$

$$Q_{v1} = Q_{vN} \frac{T}{T_N} \frac{p_N}{p} = 28,5 \cdot \frac{295,15}{273,15} \cdot \frac{101325}{101640,5} = 30,758 \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (8.4)$$

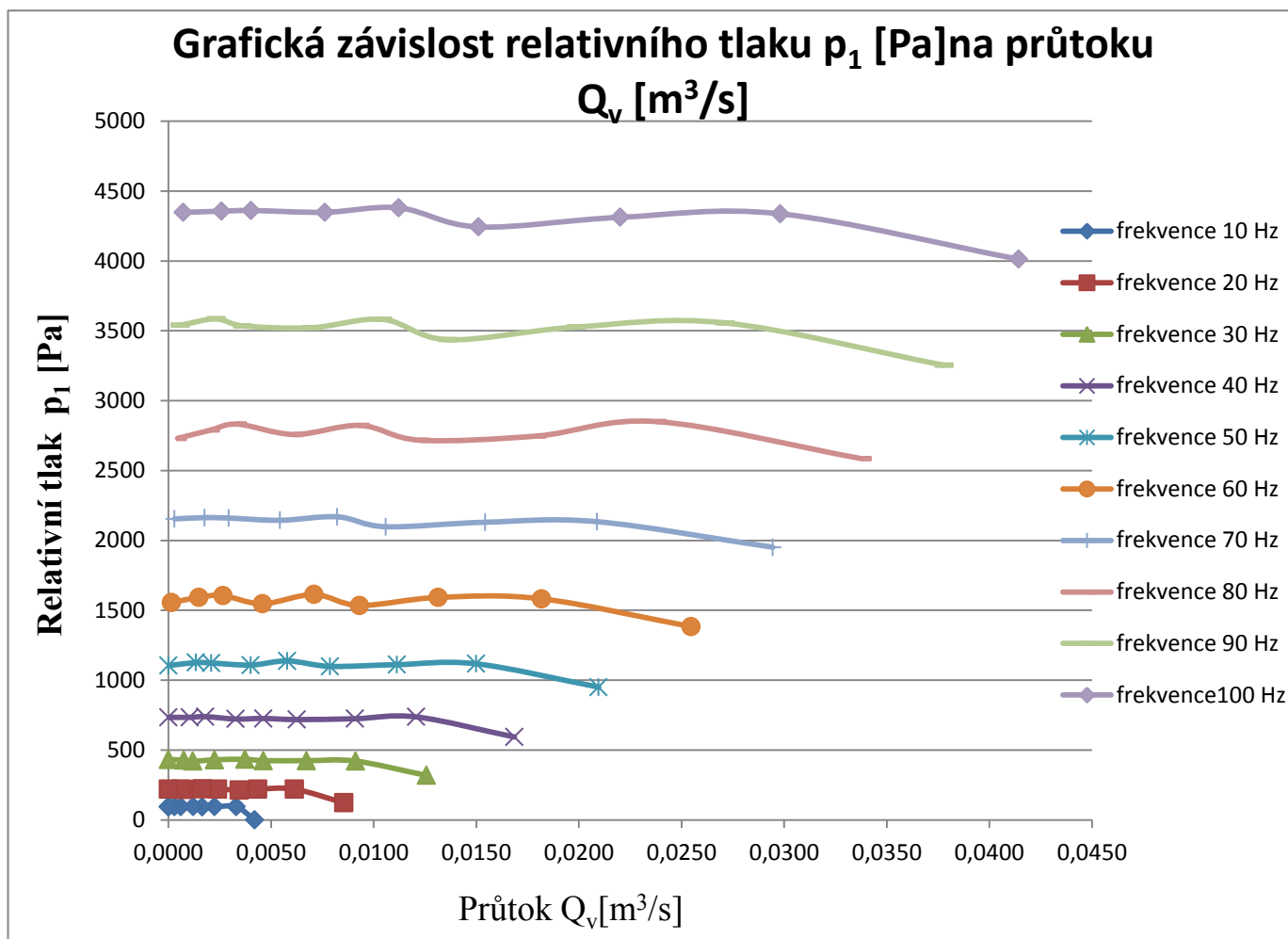
$$Q_v = Q_{v1}/3600 = 0,00846 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (8.5)$$



Obr. 8.1 Grafické zobrazení závislosti absolutního tlaku p [Pa] na průtoku Q_v [m³/s]

Výsledná charakteristika ventilátoru pro různé frekvence je zobrazena na obr. (8.1). Charakteristika udává závislost $p = f(Q_v)$.

Na obrázku (8.1) je zobrazena závislost absolutního tlaku p [Pa] na objemového průtoku Q_v [m³/s]. Z grafu je vidět že, s rostoucí frekvencí roste i tlakový spád na ventilátoru. Maxiální průtok ventilátoru je 0,0414 [m³/s].



Obr. 8.2 Grafické zobrazení závislosti relativního tlaku p_1 na průtoku Q_v

Výsledná charakteristika ventilátoru pro různé frekvence je zobrazena na obr.(8.2). Charakteristika udává závislost $p_1 = f(Q_v)$.

Na obrázku (8.2) je zobrazena závislost měřeného relativního tlaku p_1 [Pa] na objemového průtoku Q_v [m³/s]. Z grafu je vidět že, s rostoucí frekvencí roste i tlakový spád.

V přílohách (A - G) jsou zobrazeny závislosti absolutního tlaku p [Pa] na průtoku Q_v [m³/s] pro určitou polohu uzavření plastového kulového ventilu v rozsahu frekvence (10 ÷ 100)Hz.

9 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo měření charakteristiky ventilátoru na vzduchové trati s regulací průtoku. Navrhl jsem experimentální měřicí trať, kterou jsem následně sestavil. Na takto sestavené trati jsem poté realizoval praktické měření charakteristiky ventilátoru, ovládaného pomocí frekvenčního měniče. Měření proběhlo v místnosti E 306, katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení. V první části této práce, je teoretický rozbor proudění skutečných kapalin, které charakterizuje proudění kapalin a plynů. V následující části je práce zaměřena na ventilátory a jejich rozdělení dle způsobu výstupu vzduchu, principy na kterých ventilátory pracují, jejich konstrukční typy a vlastnosti. V následující části se zabývám charakteristikami ventilátorů jako (tlaková, příkonová a účinnostní) včetně teoretického popisu charakteristiky měřeného ventilátoru HRD 1T/FU. Posléze je vysvětlena teorie měření průtoku plynů a kapalin se specifikací průtoků na hmotnostní a objemový. Ke každé z uvedených metod je uveden základní typ měřidla.

V praktické části bakalářské práce se zabývám návrhem experimentální měřicí trati určené k měření charakteristiky ventilátoru HRD 1T/FU. Byla sestava měřicí trať, která obsahovala prvky jako digitální průtokoměr typ SD 9000 od firmy IFM electronic, který pracuje na principu žárového anemometru a digitální převodník tlaku typ Almemo FD8612DPS s vyhodnocovacím zařízením Almeno. Z těchto dvou zařízení byly posléze vyhodnoceny hodnoty tlaku na výstupu z ventilátoru a průtoku vzduchu z ventilátoru v $[\text{Nm}^3/\text{h}]$. Ventilátor s elektromotorem byl ovládán přes frekvenční měnič, kterým se měnila hodnota frekvence v rozsahu (10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 Hz). Na konci této trati byl umístěn plastový kulový kohout, kterým se reguloval průtok vzduchu. V průběhu každé z frekvencí byl plastový kulový kohout 8x přiškrcen až do téměř uzavřené polohy. Digitálním průtokoměrem byla odečtena hodnota průtoku v $[\text{Nm}^3/\text{h}]$. Proto byla potřeba přepočtu na pracovní podmínky při měření. Pro měřicí trať bylo použito stejné plastové potrubí světlosti 50mm. V závěru této práce jsou uvedeny naměřená data ve formě tabulek a vyhodnocení charakteristiky ventilátoru skrz grafické zobrazení viz. (obr.8.1). Z grafu (obr.8.1) je viditelné že se rostoucí frekvencí otáček ventilátoru se zvětšoval objemový průtok ventilátoru Q_v , který se pohyboval v rozmezí od $Q_v = 0,0042$ do $Q_v = 0,0414 [\text{m}^3/\text{s}]$ uvedená data viz.(měření č.1, tab 7.1). Dále je patrné z obrázku (8.2), že s rostoucím průtokem klesal tlak na výstupu z ventilátoru.

10 Seznam použité literatury

- [1] MIKAN, J. Měření plynů. Říčany u Prahy, 2003, 386 s. ISBN 80-7328-053-1.
- [2] TECHMANIA - EDUTORIUM. Proudění tekutin. [online].[cit. 2013-11-13]. Dostupné z:http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d656368616e696b61h&key=281
- [3] Vladimír Zmrhal. Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I). [Online]. [Citace: 11. 5 2015.].Dostupné z:<http://www.tzb-info.cz/3733-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-1-cast>.
- [4] <http://www.energoekonom.cz/produkty-hrd-1t-fu-fuk-detail-107>
- [5] KADLEC, Karel. Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití (část 1). [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z:
- [6] KADLEC, Karel. Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití (část 2). [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z:
- [7] KADLEC, Karel. Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití (část 3). [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z:
- [8] ORLÍKOVÁ, Soňa. Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů. [online]. [cit. 2015-11-5]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy>
- [9] Jan,KLEPÁRNÍK. Objemové průtokoměry.[online].[citace 2015.11.5]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_probjemove.htm
- [10] GUYTON, Arthur C a John E HALL. *Textbook of Medical Physiology*. 11. vydání. Elsevier, 2006. 0 s. 11; [ISBN 978-0-7216-0240-0](http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy).
- [11] NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, et al. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Praha : Grada, 2005. 524 s. [ISBN 80-247-1152-4](http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy).
- [12] DRÁBKOVÁ, S.; KOLEKTIV. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4
- [13] <http://www.datacon.cz/turbinove-prutokomery-hoffer-a-jejich-vlastnosti.html>
- [14] http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_kapalinove.htm
- [15] <http://www.ifm.com/products/cz/ds/SD9000.htm>